

DOI: 10.4467/29567610PIB.26.006.23478

**Julia Banaś**

Wyższa Szkoła Kształcenia Zawodowego

ORCID: 0009-0003-9105-0950

juliabanas02@gmail.com

## WODA JAKO NATURALNA GRANICA POSZUKIWAŃ. DLACZEGO ŚRODOWISKO WODNE JEST JEDNYM Z NAJTRUDNIEJSZYCH OBSZARÓW POSZUKIWAWCZYCH?

## WATER AS A NATURAL EXPLORATION FRONTIER. WHY THE AQUATIC ENVIRONMENT IS ONE OF THE MOST DIFFICULT EXPLORATION AREAS?

### Streszczenie

Środowisko wodne należy do najbardziej wymagających obszarów działań poszukiwawczych ze względu na dynamiczne procesy fizyczne, ograniczoną obserwowalność i podwyższone ryzyko operacyjne. Rzeki, jeziora i akweny morskie cechują zmienne prądy, złożone interakcje hydrologiczne i niska przejrzystość, co utrudnia przewidywanie dryfu osób oraz obiektów. Artykuł syntetyzuje kluczowe czynniki determinujące trudność działań Search and Rescue (SAR) oraz przedstawia najnowsze rozwiązania techniczne i organizacyjne: modelowanie dryfu, wykorzystanie sonarów i radarów, zastosowania dronów powietrznych, nawodnych i podwodnych, a także narzędzia hydrologii operacyjnej i zintegrowane systemy wsparcia decyzji. Metodologicznie tekst opiera się na krytycznej analizie aktualnej literatury naukowej oraz raportów operacyjnych dotyczących poszukiwań w środowisku wodnym. Przegląd literatury dowodzi, że skuteczność SAR w wodzie rośnie wraz z łączeniem interdyscyplinarnej wiedzy z zaawansowanym monitorowaniem i modelowaniem, co ogranicza niepewność, poprawia bezpieczeństwo ratowników oraz zwiększa skuteczność lokalizacji zaginionych i zabezpieczenia materiału dowodowego.

**Słowa kluczowe:** środowisko wodne, SAR, dryf, hydrologia operacyjna, sonar/radar

### Abstract

Aquatic environments rank among the most demanding search domains due to dynamic physical processes, limited observability, and elevated operational risk. Rivers, lakes, and marine areas feature variable currents, complex hydrological interactions, and low water clarity, all of which hinder prediction of drift for persons and objects. This article synthesizes principal factors

that constrain Search and Rescue (SAR) and outlines state-of-the-art technical and organizational solutions: drift modelling, deployment of sonar and radar, use of aerial, surface, and underwater drones, as well as operational hydrology tools and integrated decision-support systems. Methodologically, the paper is based on a critical review of recent scientific literature and operational reports related to aquatic search activities. A review of recent studies indicates that effectiveness in aquatic SAR increases when interdisciplinary knowledge is combined with advanced monitoring and modelling, reducing uncertainty, enhancing responder safety, and improving both the likelihood of locating missing persons and the preservation of evidential material.

**Keywords:** aquatic environment, SAR, drift, operational hydrology, sonar/radar

## Wprowadzenie

Środowisko wodne stanowi jeden z najbardziej wymagających obszarów działań poszukiwawczo-ratowniczych z uwagi na współwystępowanie dynamicznych procesów fizycznych, złożonych warunków hydrologicznych oraz ograniczonej obserwowalności. W licznych sprawach zaginięć ostatnim uchwytym śladem okazują się rzeki, jeziora lub akweny morskie. Badania poświęcone odzyskiwaniu ciał z wody wskazują, że istotna część osób zaginionych jest ostatecznie odnajdywana właśnie w środowisku wodnym, a brak pełnych danych o ruchu ciała utrudnia planowanie poszukiwań i dochodzenia kryminalistyczne<sup>1</sup>.

Problem badawczy niniejszego artykułu koncentruje się na identyfikacji czynników, które sprawiają, że środowisko wodne stanowi naturalną granicę skutecznych działań poszukiwawczych, oraz na ocenie, w jakim stopniu współczesne technologie i modele predykcyjne pozwalają tę granicę przesuwać. W odróżnieniu od poszukiwań lądowych, gdzie możliwe jest relatywnie precyzyjne wyznaczenie sektorów i tras przemieszczania się osoby zaginionej, w środowisku wodnym dominuje wysoka niepewność wynikająca z oddziaływania procesów fizycznych niezależnych od działań człowieka<sup>2</sup>. Luka badawcza dotyczy przede wszystkim integracji wiedzy hydrologicznej, danych empirycznych oraz procedur operacyjnych SAR w spójne podejście planistyczne<sup>3</sup>.

Aby uporządkować zakres prowadzonych rozważań i nadać im jasno sprecyzowaną strukturę analityczną, artykuł formułuje zestaw pytań badawczych, które wyznaczają kierunek dalszej części rozważań. Ich celem jest nie tylko doprecyzowanie obszarów wymagających pogłębionej analizy, lecz także

---

<sup>1</sup> L. Dennison-Wilkins, L. Hackman, M. Hayatdavoodi, *The body recovery from water study: The application of science to missing person search*, "Policing: A Journal of Policy and Practice", 17/4.

<sup>2</sup> C. Delhez, T. Andrianne, S. Erpicum, N. Rivière, P. Hallot, M. Pirotton, P. Archambeau, B. Dewals, *Force coefficients for modelling the drift of a victim of river drowning*, "Natural Hazards", 120/2024, 6245–6273.

<sup>3</sup> K. Punnengattu Padi Subramanian, *Maritime Search and Rescue Operations*, Bournemouth 2024.

wskazanie kluczowych problemów praktycznych związanych ze skutecznością działań poszukiwawczo-ratowniczych w środowisku wodnym. W związku z tym podjęto próbę odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Jakie właściwości środowiska wodnego – hydrologiczne, fizyczne i morfologiczne – najbardziej ograniczają skuteczność działań poszukiwawczo-ratowniczych?
2. W jakim stopniu współczesne technologie stosowane w działaniach SAR (sonary, systemy radarowe, modele dryfu, platformy bezzałogowe) pozwalają zredukować niepewność operacyjną wynikającą z dynamiki akwenów?
3. Jak integracja danych środowiskowych, pomiarowych i operacyjnych wpływa na efektywność planowania i prowadzenia poszukiwań osób zaginionych w środowisku wodnym?
4. Jakie luki organizacyjne i proceduralne utrudniają komplementarne wykorzystanie dostępnych technologii i modeli w praktyce SAR?

W oparciu o dotychczasowy stan wiedzy, wyniki badań hydrologicznych oraz obserwacje praktyczne przyjęto następującą hipotezę badawczą: Skuteczność działań poszukiwawczo-ratowniczych w środowisku wodnym wzrasta istotnie wtedy, gdy technologie detekcji (sonar, radar, platformy bezzałogowe) oraz modele dryfu są stosowane w sposób komplementarny i integrowane z aktualnymi danymi hydrologicznymi oraz procedurami operacyjnymi. Brak takiej integracji prowadzi do zwiększenia niepewności, błędów planistycznych i nieefektywnego wykorzystania zasobów.

Osią konstrukcyjną niniejszego artykułu jest teza, zgodnie z którą środowisko wodne stanowi naturalną granicę skuteczności działań poszukiwawczych, lecz granicę tę można przesuwać jedynie poprzez komplementarne łączenie technologii detekcyjnych, modeli hydrodynamicznych oraz spójnych procedur operacyjnych. Sama technologia – stosowana w oderwaniu od wiedzy eksperckiej, danych środowiskowych i właściwej organizacji działań – nie jest w stanie zapewnić wysokiej skuteczności SAR.

Z punktu widzenia oceanografii i hydrologii operacyjnej ruch unoszących się obiektów (osób i elementów wyposażenia) jest wynikiem zmieniającej się interakcji prądów, falowania, wiatru oraz lokalnych czynników batymetrycznych. W badaniach wykazano, że krótkotrwałe struktury transportowe (TRAPs) mogą skupiać obiekty dryfujące i tworzyć strefy zwiększonej koncentracji – obszary o podwyższonym prawdopodobieństwie detekcji i odzysku<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> M. Serra, P. Sathe, I. Rypina, A. Kirincich, S.D. Ross, P. Lermusiaux, A. Allen, T. Peacock, G. Haller, *Search and rescue at sea aided by hidden flow structures*, "Nature Communications", 11/2020, 2525.

Uzupełniając tło problemu, należy podkreślić wymiar społeczny i psychologiczny zdarzeń wodnych: długotrwała niepewność dotycząca losu osoby zaginionej bywa dla rodzin szczególnie dotkliwa, a czas uzyskania rozstrzygającej informacji jest skorelowany ze skutecznością działań na wodzie<sup>5</sup>. Opracowania poświęcone odzyskiwaniu ciał wskazują, że zwiększenie precyzji planowania poszukiwań skraca czas do osiągnięcia rozstrzygnięcia i ogranicza ryzyko po stronie operatorów, wspierając jednocześnie proces dowodowy<sup>6</sup>.

W praktyce planistycznej różnicuje się podejście do rzek, jezior i stref przybrzeżnych. Rzeki wymuszają szybkie modelowanie dryfu wzdłużnym nurtem oraz kontrolę efektów przybrzeżnych, meandrów i przeszkód hydrotechnicznych<sup>7</sup>. Jeziora – zwłaszcza głębokie i zatorfione – wprowadzają problematykę warstwowania termicznego, prądów dennych i resuspensji osadów<sup>8</sup>. Strefy przybrzeżne łączą wpływ falowania, prądów przybrzeżnych i pływów, co zwiększa niepewność prognoz; w każdym z tych środowisk lokalna batymetria i sedymentologia decydują o zasięgu użytecznej obserwowalności i doborze sensorów<sup>9</sup>.

Pomimo dynamicznego rozwoju technologii wykorzystywanych w działaniach SAR, obserwacje operacyjne jednoznacznie wskazują, że technologia nie stanowi samodzielnego rozwiązania problemu poszukiwań w środowisku wodnym. Brak komplementarności pomiędzy narzędziami technicznymi, modelami hydrodynamicznymi i procedurami operacyjnymi powoduje, że skuteczność działań zależy przede wszystkim od jakości integracji danych, doświadczenia zespołów oraz spójności organizacyjnej.

## **Bariery i mechanizmy utrudniające działania w wodzie**

Najbardziej intuicyjną barierą operacyjną są prądy wodne, które już po krótkim czasie mogą znacznie przemieścić ciało lub przedmiot, oddalając je od miejsca wejścia do wody. W badaniach eksperymentalnych oszacowano, że współczynniki sił hydrodynamicznych działających na sylwetkę człowieka są silnie zależne od pozycji, kąta natarcia i charakterystyki odzieży; różnice w oporze sięgają nawet około 50%, a luźne ubranie zwiększa opór średnio

---

<sup>5</sup> L. Dennison-Wilkins, L. Hackman, M. Hayatdavoodi, *The body recovery from water study:...*, op. cit.

<sup>6</sup> Ibidem.

<sup>7</sup> C. Delhez, T. Andrianne, S. Erpicum, S., et al., *Natural Hazards*, 120/2024, 6245–6273.

<sup>8</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used to understand the location of a drowned person*, "Journal of Hydrology", 513, 164–168.

<sup>9</sup> K. Punnengattu Padi Subramanian, *Maritime search and rescue operations*. <https://www.researchgate.net/.../Maritime-Search-and-Rescue-Operations.pdf> (dostęp: 17.02.2026).

o 30%. Rezultatem są trajektorie dryfu odbiegające od intuicyjnych, szczególnie w rzekach o zmiennej geometrii i prędkości przepływu<sup>10</sup>.

Drugim, nie mniej istotnym czynnikiem jest ograniczona widoczność. Mętność wody, obecność zawiesiny i roślin, a także muliste osady powodują, że metody wzrokowe zawodzą, a detekcja wymaga sensorów akustycznych. Mimo to nawet wysokiej klasy sonar nie zawsze zapewnia jednoznaczną identyfikację: ludzkie ciało często nie daje silnego kontrastu akustycznego, a częściej rozpoznawalny bywa jego cień akustyczny niż sygnał odbity od samego obiektu<sup>11</sup>. Wraz z degradacją tkanek rosną wymagania rozdzielczości i maleje zasięg efektywnego obrazowania<sup>12</sup>.

Trzecia bariera dotyczy czasu i degradacji materiału dowodowego. Szybka lokalizacja ma znaczenie nie tylko dla szans ratunkowych – w literaturze wskazuje się na krytyczne „okno 90 minut”, ale również dla zachowania integralności śladów. Działanie w wodzie przyspiesza niszczenie materiału biologicznego i wypłukiwanie śladów fizycznych, co z każdym dniem obniża wartość dowodową znalezisk i utrudnia rekonstrukcję zdarzeń<sup>13</sup>.

Czwartym czynnikiem pozostaje bezpieczeństwo ratowników. Ograniczona przejrzystość, możliwość zaplątania w roślinność, niestabilne podłoże oraz niska temperatura znacząco zwiększają ryzyko pracy pod wodą. W takich warunkach kluczowe jest wstępne rozpoznanie dna i przeszkód, najlepiej jeszcze przed wejściem zespołów nurkowych, z użyciem zdalnych platform i czujników o odpowiedniej rozdzielczości<sup>14</sup>.

Piątą istotną barierą są ograniczenia proceduralne i decyzyjne, wynikające z wysokiego poziomu niepewności operacyjnej. W środowisku wodnym dane wejściowe do planowania poszukiwań – takie jak czas i miejsce wejścia do wody, pozycja ciała, warunki hydrometeorologiczne czy charakterystyka dna – są często fragmentaryczne lub obarczone dużym błędem. Skutkuje to koniecznością podejmowania decyzji przy niepełnej informacji, co zwiększa ryzyko błędnego wyznaczenia obszaru poszukiwań i nieefektywnego wykorzystania zasobów. W praktyce operacyjnej oznacza to częste korekty planów, wydłużenie czasu działań oraz trudności w jednoznacznym rozstrzygnięciu, kiedy poszukiwania powinny zostać zakończone lub przeformułowane.

<sup>10</sup> Ibidem.

<sup>11</sup> P. Blondel, *Searching for dead bodies with sonar* [w:] J.J.L.M. Bierens (ed.), *Drowning*, Berlin 2014.

<sup>12</sup> Ibidem.

<sup>13</sup> L. Dennison-Wilkins, L. Hackman, M. Hayatdavoodi, *The body recovery from water study...*, op. cit.

<sup>14</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used to understand the location of a drowned person*, „Journal of Hydrology”, 513(2014), 164–168.

Szóstym czynnikiem utrudniającym działania w wodzie jest kumulacja ograniczeń technicznych i środowiskowych, która potęguje efekt pozostałych barier. Zakłócenia pracy sensorów akustycznych spowodowane ukształtowaniem dna, obecnością przeszkód antropogenicznych lub niejednorodnością osadów mogą prowadzić do fałszywych wskazań lub pominięcia obiektów. Jednocześnie zmienność warunków hydrologicznych w czasie, takich jak nagłe zmiany przepływu, wzrost mętności czy wahania poziomu wody, powoduje, że wyniki rozpoznania szybko tracą aktualność. W konsekwencji skuteczne działania poszukiwawcze wymagają nie tylko odpowiedniego zaplecza technicznego, lecz także ciągłej walidacji danych oraz ścisłej integracji informacji środowiskowych z doświadczeniem zespołów operacyjnych<sup>15,16</sup>.

Analiza wskazuje, że trudności wynikają nie tylko z uwarunkowań środowiskowych, lecz również z braku zintegrowanego podejścia operacyjnego. W praktyce to nie sam brak sprzętu, ale brak jego komplementarnego wykorzystania stanowi kluczowe ograniczenie. Technologie stosowane osobno nie dostarczają jednoznacznych wyników, dopiero ich pełna synergia pozwala na redukcję niepewności operacyjnej.

## Współczesne metody i technologie poprawiające skuteczność

Ostatnie lata przyniosły gwałtowny wzrost możliwości rozpoznania i przetwarzania danych z akwenów. Bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w lekkie sonary pozwalają w krótkim czasie zmapować batymetrię i zidentyfikować zagrożenia nurkowe bez angażowania łodzi. Koncepcja „Dronar” łączy mobilność UAV z obrazowaniem sonarowym, dostarczając geolokalizowanych map dna do planowania rozmieszczenia zespołów i środków technicznych. Równolegle zdalne i autonomiczne platformy nawodne (USV) oraz podwodne (UUV) prowadzą rekonesans i poszukiwania w strefach zbyt ryzykownych dla ludzi, w tym przy silnych prądach, niskiej widoczności i nocą<sup>17</sup>.

W środowiskach zimowych i zlodzonych na znaczeniu zyskują techniki radarowe. W kontrolowanych badaniach terenowych wykazano, że radar GPR przeciągany po powierzchni lodu umożliwia detekcję ciał znajdujących się pod lodem o znacznej grubości. Rozwiązanie jest bezkontaktowe, a zatem ogranicza ryzyko dla zespołów i może być potencjalnie integrowane

<sup>15</sup> Ibidem.

<sup>16</sup> P. Blondel, *Searching for dead bodies...*, op. cit.

<sup>17</sup> K. Punnengattu Padi Subramanian, *Maritime search and rescue operations*, <https://www.researchgate.net/.../Maritime-Search-and-Rescue-Operations.pdf> (dostęp: 18.02.2026).

z platformami autonomicznymi przeznaczonymi do pracy na pokrywie lodowej<sup>18</sup>.

Nie do przecenienia są również klasyczne i nowoczesne techniki sonarowe: sonar boczny, echosondy wielowiązkowe i profilery dopplerowskie. W praktyce rozpoznawania ofiar utonięć istotne jest nie tylko „zobaczenie” obiektu, lecz także właściwa interpretacja cienia akustycznego, planowanie tras przelotów/holowania i adaptacja ustawień do warunków dna oraz osadów. Dobra praktyka zakłada iteracyjne zawężanie obszaru poszukiwań dzięki łączeniu danych akustycznych z informacjami o prądach i morfologii zbiornika<sup>19, 20</sup>. Warto podkreślić, że żadne z omawianych narzędzi nie jest wystarczające, jeśli stosuje się je w izolacji. Dane sonarowe, modele dryfu i obserwacje środowiskowe muszą być zestawiane i weryfikowane wzajemnie. Praktyczne doświadczenia autora wskazują, że największe błędy decyzyjne wynikają nie z niedoskonałości technologii, ale z niewłaściwej interpretacji danych oraz braku ich integracji.

Trzon współczesnych działań stanowią jednak modele predykcyjne. Z jednej strony mamy zbiory danych z incydentów i eksperymentów opisujące zachowanie ciał w wodzie śródlądowej, które umożliwiają kalibrację parametrów i wyznaczanie wstępnych obszarów poszukiwań. Z drugiej, badania nad siłami działającymi na ciało w rzekach pozwalają na bardziej fizycznie ugruntowane modelowanie dryfu, uwzględniające pozycję i odzież. W środowisku morskim rośnie rola diagnostyk przepływu ujawniających przejściowe struktury przyciągające (TRAPs), które w krótkim horyzoncie czasowym „zbierają” obiekty dryfujące i przez to zawężają obszar poszukiwań<sup>21, 22</sup>.

Równolegle rozwijane są systemy wspomagania decyzji, które integrują dane hydrometeorologiczne, batymetryczne i operacyjne. Przeglądy pokazują, że choć na lądzie GIS i metody sztucznej inteligencji są coraz szerzej stosowane, w morskim SAR wciąż istnieje luka badawcza i wdrożeniowa, szczególnie w zakresie kompleksowych, zintegrowanych narzędzi planistycznych.

---

<sup>18</sup> G.G. Giesbrecht, M. Patel, R. Javid, S. Murray, V. Patel, N. Wiens, D. Xie, I. Jeffrey, P. Ferguson, *Ground penetrating radar used to detect drowning victims under ice*, “Forensic Sciences Research” 8(4)/2023, 280–287.

<sup>19</sup> P. Blondel, *Searching for dead bodies...*, op. cit.

<sup>20</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used...*, op. cit.

<sup>21</sup> C. Delhez, T. Andrienne, S. Erpicum, et al., *Force coefficients for modelling the drift of a victim of river drowning*, “Natural Hazards”, 120/2024, 6245–6273.

<sup>22</sup> M. Serra, P. Sathe, I. Rypina, et al., *Search and rescue at sea aided by hidden flow structures*, “Nature Communications”, 11/2020, 2525.

W literaturze dotyczącej planowania i koordynacji MSAR wskazuje się natomiast na potencjał rozwiązań SI i architektury zdecentralizowanej, które mogą poprawiać szybkość reakcji, dyspozycję zasobów i adaptacyjność w warunkach wysokiej niepewności<sup>23, 24</sup>.

W perspektywie metodologicznej warto pamiętać, że dzisiejsze podejścia są spadkobiercami dekad badań nad dryfem obiektów na morzu: od wczesnych studiów „leeway” po rozwój stochastycznych modeli Lagrange’a oraz metody bezpośredniego pomiaru względnego dryfu względem prądu. Syntetyczne przeglądy rozwoju tych metod podkreślają znaczenie jednoczesnego wykorzystania danych obserwacyjnych, prognoz numerycznych i obserwacji *in situ*<sup>25, 26</sup>.

Doprecyzowując diagnostykę przepływu, praktyki terenowe obejmują szybkie rozmieszczenie boi dryfujących i manekinów testowych w rejonie ostatniej znanej pozycji. Trajektorie tych znaczników, zestawiane z polami prędkości z modeli numerycznych i obserwacji radarowych/ADCP, pomagają wykrywać strefy lokalnej konwergencji, które bywają zgodne z obszarami TRAPs wyznaczanymi z danych powierzchniowych. Włączenie takich obserwacji do pętli planistycznej skraca czas potrzebny na zaktualizowanie sektorów poszukiwań i pozwala skierować zasoby w obszary o najwyższym priorytecie. Warto zaakcentować ograniczenia technologiczne. W podejściu „Dronar” pogoda i roślinność ograniczają efektywność; minimalizuje się je krótkimi misjami i łączeniem UAV z czujnikami nawodnymi. W sonarach wielowiązkowych konieczna jest filtracja zakłóceń i dobór częstotliwości,

Istotnym uzupełnieniem opisywanych technologii jest wykorzystanie danych satelitarnych i obserwacji teledetekcyjnych. Choć ich rozdzielczość przestrzenna bywa niewystarczająca do bezpośredniej detekcji obiektów w wodzie, dane satelitarne umożliwiają identyfikację zjawisk pośrednich, takich jak struktury powierzchniowe, fronty termiczne czy zmienność koloru wody. Informacje te mogą wspierać wstępne wyznaczenie obszarów o podwyższonym prawdopodobieństwie koncentracji obiektów dryfujących, zwłaszcza w środowisku morskim i przybrzeżnym, oraz stanowić wartościowe uzupełnienie modeli hydrodynamicznych. Implikacją praktyczną jest

---

<sup>23</sup> W. Nasar, R. Da Silva Torres, O.E. Gundersen, A.T. Karlsen, *The use of decision support in search and rescue: A systematic literature review*, "ISPRS International Journal of Geo-Information", 12(5)/2023, 182.

<sup>24</sup> K.I. Kilic, S. Maity, I. Sung, P. Nielsen, *Challenges and AI-driven solutions in maritime search and rescue planning: A comprehensive literature review*, "Marine Policy", 178/2025, 106692.

<sup>25</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used...*, op. cit.

<sup>26</sup> M. Serra, P. Sathe, I. Rypina, et al., *Search and rescue...*, op. cit.

możliwość zawężenia obszaru poszukiwań już na etapie planowania operacji, jeszcze przed skierowaniem zasobów technicznych i zespołów terenowych, co pozwala ograniczyć koszty i skrócić czas reakcji<sup>27</sup>.

Coraz większą rolę odgrywa także integracja danych wieloźródłowych w ramach jednolitego obrazu sytuacyjnego. Łączenie informacji pochodzących z sonarów, radarów, platform bezzałogowych, boi pomiarowych oraz modeli numerycznych pozwala ograniczać niepewność pojedynczych metod i zwiększać wiarygodność prognoz. Warunkiem skuteczności takiego podejścia jest jednak spójność czasowa i przestrzenna danych oraz odpowiednie procedury ich walidacji. Brak standaryzacji formatów i algorytmów integracyjnych pozostaje jednym z istotnych wyzwań we wdrażaniu zaawansowanych systemów wsparcia decyzji w działaniach SAR. W praktyce operacyjnej oznacza to konieczność opracowania jasnych procedur wymiany danych między podmiotami oraz wyznaczenia zespołów odpowiedzialnych za bieżącą syntezę informacji na potrzeby dowodzenia akcją<sup>28</sup>.

Z perspektywy operacyjnej należy również podkreślić znaczenie kompetencji analitycznych personelu obsługującego zaawansowane narzędzia technologiczne. Nawet najbardziej zaawansowane systemy obrazowania i modelowania nie eliminują konieczności eksperckiej interpretacji wyników, uwzględniającej lokalne uwarunkowania hydrologiczne i doświadczenie terenowe. Błędy interpretacyjne, nadmierne zaufanie do automatycznych wskazań lub nieuwzględnienie ograniczeń modeli mogą prowadzić do błędnych decyzji planistycznych. Warto zauważyć potrzebę systematycznego szkolenia operatorów oraz traktowania narzędzi technologicznych jako wsparcia decyzyjnego, a nie autonomicznego źródła rozstrzygnięć operacyjnych.

## Perspektywy rozwoju i rekomendacje operacyjne

Najbardziej obiecującym kierunkiem jest tworzenie „cyfrowych bliźniaków” akwenów – zintegrowanych modeli łączących batymetrię, dane hydrodynamiczne, obrazowanie akustyczne i obserwacje satelitarne, zasilanych strumieniowo informacjami z boi, dronów i jednostek patrolowych. Tego typu rozwiązania pozwolą symulować scenariusze dryfu w niemal rzeczywistym czasie, aktualizować prognozy wraz ze zmianą warunków i sugerować optymalne rozmieszczenie zasobów. Przeglądy wskazują jednak, że w morskim

<sup>27</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used...*, op. cit.

<sup>28</sup> K.I. Kilic, S. Maity, I. Sung, P. Nielsen, *Challenges and AI-driven...*, op. cit.

SAR brakuje jeszcze dojrzałych, operacyjnych wdrożeń tak pojmowanych systemów, co wyznacza ważny wektor badań i standaryzacji<sup>29, 30</sup>.

Kolejnym filarem rozwoju jest autonomizacja zasobów. Architektury oparte na współpracy rojów UAV/USV/UUV i algorytmach uczenia głębokiego umożliwiają dynamiczne planowanie tras, automatyczną detekcję niewielkich celów na tle wzburzonej powierzchni oraz inteligentne łączenie danych z wielu czujników, co wcześniej wymagało dużego zespołu analityków. Zintegrowane, zdecentralizowane systemy SI mogą przy tym skrócić czas reakcji i poprawić bezpieczeństwo ludzi<sup>31</sup>.

Z perspektywy organizacyjnej kluczowa pozostaje koordynacja między służbami i wolontariuszami oraz przejrzyste procedury wymiany danych. Dobre praktyki obejmują wczesne wykorzystanie obserwacji oceanograficznych do wsparcia planowania i prowadzenia akcji – od szybkiej parametryzacji prądów i wiatru, przez wdrożenie boi dryfujących w rejonie „ostatniego śladu”, po zawężanie obszaru poszukiwań na podstawie informacji zwrotnych z kolejnych przeszukań<sup>32</sup>.

Ważnym wyzwaniem jest też jakość danych. Niepewności obserwacyjne, ograniczenia modeli oraz błędy proceduralne potrafią się kumulować. Praktyki dobrego zarządzania danymi przewidują walidację krzyżową czujników, wersjonowanie danych i śledzenie pochodzenia parametrów, co ułatwia audyt pooperacyjny i uczenie się na błędach<sup>33</sup>.

Rekomendacje operacyjne można streścić w czterech zasadach:

1. Planuj warstwowo: od modeli i danych satelitarnych, przez rozpoznanie UAV/USV do precyzyjnego obrazowania sonarowego i dopiero działań nurkowych<sup>34</sup>.
2. Utrzymuj pętlę informacji zwrotnej: każda nieudana próba przeszukania aktualizuje model prawdopodobieństwa i priorytety sektorów.

---

<sup>29</sup> W. Nasar, R. Da Silva Torres, O.E. Gundersen, A.T. Karlsen, *The Use of Decision Support in Search and Rescue: A Systematic Literature Review*, "ISPRS International Journal of Geo-Information (IJGI)", 12(5)/2023, 182.

<sup>30</sup> K.I. Kilic, S. Maity, I. Sung, P. Nielsen, *Challenges and AI-driven...*, op. cit.

<sup>31</sup> Ibidem.

<sup>32</sup> M. Serra, P. Sathe, I. Rypina, et al., *Search and rescue...*, op. cit.

<sup>33</sup> W. Nasar, R. Da Silva Torres, O.E. Gundersen, A.T. Karlsen, *The Use of Decision Support in Search...*, op. cit.

<sup>34</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used...*, op. cit.

3. Dokumentuj parametry misji i decyzje, aby zapewnić powtarzalność i wnioski pooperacyjne<sup>35</sup>.
4. Integruj wolontariuszy poprzez jasne SOP-y, ograniczanie ekspozycji na ryzyko i dedykowane kanały raportowania<sup>36</sup>. Kluczowe jest, aby technologia była elementem systemu, a nie jego podstawą. Nawet najlepsze sensory wymagają interpretacji eksperckiej, a procedury muszą przewidywać ich ograniczenia.

### **Konsekwencje środowiska wodnego dla rekonstrukcji zdarzeń i wartości dowodowej materiału**

W przeciwieństwie do rozdziałów II–IV, które koncentrują się na barierach i technologiach SAR, niniejsza część analizuje konsekwencje środowiska wodnego z perspektywy procesu dowodowego i rekonstrukcji zdarzeń.

Jednym z kluczowych problemów jest rozbieżność pomiędzy miejscem wejścia obiektu do wody a miejscem jego odnalezienia. Trajektorie dryfu, determinowane przez prądy, warunki wiatrowe oraz właściwości samego obiektu, powodują, że lokalizacja ujawnienia rzadko odpowiada pierwotnemu punktowi zdarzenia. Pominięcie modelowania dryfu w analizie śledczej sprzyja formułowaniu błędnych hipotez dotyczących czasu, miejsca oraz charakteru zdarzenia, co może prowadzić do nieprawidłowych wniosków procesowych<sup>37</sup>.

Środowisko wodne wpływa również destrukcyjnie na materiał biologiczny oraz mikroślady. Długotrwałe oddziaływanie wody przyspiesza degradację tkanek, wypłukiwanie materiału genetycznego oraz zacieranie obrażeń powierzchniowych, co znacząco ogranicza możliwości diagnostyki sekcyjnej i identyfikacyjnej, zwłaszcza w przypadkach opóźnionego odnalezienia ciała. W konsekwencji zmniejsza się wartość dowodowa materiału biologicznego, a rekonstrukcja mechanizmu śmierci staje się mniej jednoznaczna<sup>38</sup>.

Istotną rolę w ochronie kontekstu miejsca zdarzenia odgrywają bezkontaktowe metody lokalizacji. Zastosowanie obrazowania sonarowego oraz georadaru, w tym pod pokrywą lodową, umożliwi wykrywanie ciał i obiektów bez konieczności wprowadzania nurków, co minimalizuje ingerencję

---

<sup>35</sup> W. Nasar, R. Da Silva Torres, O.E. Gundersen, A.T. Karlsen, *The Use of Decision Support in Search...*, op. cit.

<sup>36</sup> K. Punnengattu Padi Subramanian, *Maritime search and rescue...*, op. cit.

<sup>37</sup> L. Dennison-Wilkins, L. Hackman, M. Hayatdavoodi, *The body recovery from water study...*, op. cit.

<sup>38</sup> Ibidem.

w środowisko oraz ogranicza ryzyko operacyjne. Uzupełnieniem tych metod są platformy bezzałogowe oraz rozwiązania typu „Dronar”, które pozwalają na szybkie i mało inwazyjne rozpoznanie akwenów trudno dostępnych, zwiększając efektywność działań przy jednoczesnym zachowaniu integralności dowodowej<sup>39</sup>.

Z perspektywy procesowej szczególnego znaczenia nabiera transparentność i audytowalność podejmowanych działań. Systematyczne gromadzenie, archiwizowanie i wersjonowanie danych hydrometeorologicznych, trajektorii boi dryfujących oraz wyników modeli predykcyjnych wzmacnia wiarygodność zastosowanej metodyki i umożliwia jej krytyczną ocenę na etapie postępowania karnego. Takie podejście sprzyja również odtwarzalności analiz oraz obronie przyjętych decyzji przed organami procesowymi<sup>40</sup>.

W ujęciu praktycznym ścisła integracja działań SAR z narzędziami geoforensycznymi – obejmująca wczesne modelowanie dryfu, szybkie wdrażanie obserwacji *in situ*, wykorzystanie bezkontaktowych technik obrazowania oraz konsekwentną dyscyplinę w zarządzaniu danymi – istotnie zwiększa szanse na sprawną lokalizację obiektów oraz rzetelną rekonstrukcję zdarzeń w środowisku wodnym<sup>41</sup>.

## Podsumowanie

Środowisko wodne nie stanowi „końca poszukiwań”, lecz jeden z najbardziej wymagających, a zarazem coraz lepiej rozpoznanych obszarów operacyjnych w działaniach na rzecz odnajdywania osób zaginionych. Postęp w zakresie hydrologii, akustyki podwodnej, systemów sensorowych oraz modelowania procesów środowiskowych sprawia, że akweny wodne przestają być przestrzenią nieprzewidywalną, a coraz częściej poddają się analizie i planowaniu.

Doświadczenia z działań poszukiwawczych wskazują, że rzeczywisty wzrost skuteczności i bezpieczeństwa operacji jest możliwy jedynie przy integracji wiedzy eksperckiej z jasno zdefiniowanymi procedurami dowodzenia, koordynacji i wymiany danych pomiędzy podmiotami zaangażowanymi w akcję. Wczesne wykorzystanie modeli dryfu, nowoczesnych technik lokalizacji oraz bieżąca aktualizacja założeń operacyjnych pozwalają lepiej

---

<sup>39</sup> A. Ruffell, A. Lally, B. Rocke, *Dronar – Geoforensic search sonar from a drone*, “Forensic Sciences”, 1(3)/2021, 202–212.

<sup>40</sup> A. Ruffell, A. Lally, B. Rocke, *Dronar...*, op. cit.

<sup>41</sup> A. Ruffell, *Lacustrine flow (divers, side scan sonar, hydrogeology, water penetrating radar) used...*, op. cit.

ukierunkować wysiłek poszukiwawczy i ograniczyć straty czasowe w kluczowej fazie działań.

Warunkiem powodzenia poszukiwań w środowisku wodnym pozostaje dyscyplina w planowaniu misji, konsekwentna weryfikacja pozyskiwanych danych oraz gotowość do adaptacji przyjętych scenariuszy wraz z napływem nowych informacji. Wymaga to ścisłej współpracy służb ratowniczych, ekspertów technicznych i środowiskowych, a także wyszkolonych wolontariuszy, których rola w systemie poszukiwań osób zaginionych pozostaje nie do przecenienia. Ostatecznie skuteczność działań SAR w środowisku wodnym zależy od synergii technologii, wiedzy hydrologicznej, doświadczenia zespołów oraz dobrze zorganizowanych procedur. Technologia pozostaje narzędziem, nie rozwiązaniem samym w sobie. To stopień integracji zasobów, a nie ich liczba, decyduje o powodzeniu operacji.

## Bibliografia

- Blondel P., *Searching for Dead Bodies with Sonar*, [w:] *Drowning*, J. Bierens (red.), Berlin 2014.
- Delhez C., Andrianne T., Ercicum S., Riviere N., Hallot P., Pirotton M., Archambeau P., Dewals B., *Force Coefficients for Modelling the Drift of a Victim of River Drowning*, „Natural Hazards”, 2024.
- Dennison-Wilkins L., Hackman L., Hayatdavoodi M., *The Body Recovery from Water Study: The Application of Science to Missing Person Search*, „Policing: A Journal of Policy and Practice” 2023.
- Giesbrecht G.G., Patel M., Javid R., Murray S., Patel V., Wiens N., Xie D., Jeffrey I., Ferguson P., *Ground Penetrating Radar Used to Detect Drowning Victims Under Ice*, „Forensic Sciences Research”, 2023.
- Kilic K.I., Maity S., Sung I., Nielsen P., *Challenges and AI-Driven Solutions in Maritime Search and Rescue Planning*, „Marine Policy”, 2025.
- Nasar W., Da Silva Torres R., Gundersen O.E., Karlsen A.T., *The Use of Decision Support in Search and Rescue: A Systematic Literature Review*, „ISPRS International Journal of Geo-Information”, 2023.
- Punnengattu Padi Subramanian K., *Maritime Search and Rescue Operations*, Bournemouth 2024.
- Ruffell A., *Lacustrine Flow (Divers, Side Scan Sonar, Hydrogeology, Water Penetrating Radar) Used to Understand the Location of a Drowned Person*, „Journal of Hydrology”, 2014.
- Ruffell A., Lally A., Rocke B., *Dronar – Geoforensic Search Sonar from a Drone*, „Forensic Sciences”, 2021.
- Serra M., Sathe P., Rypina I., Kirincich A., Ross S.D., Lermusiaux P., Allen A., Peacock T., Haller G., *Search and Rescue at Sea Aided by Hidden Flow Structures*, „Nature Communications”, 2020.